

Pengaturan Posisi Motor Sinkron Linear Magnet Permanen pada Elevator Linear dengan Sliding Mode Controller

Anindya Devi R¹, Mochammad Rameli², Rusdhianto Effendi³

Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Surabaya, Indonesia
nindyanindyanind@yahoo.com¹; mrameli@indo.net.id²; rusdhi@elect-eng.its.ac.id³

Abstract—Elevator linear telah menjadi alat transportasi vertikal yang sangat penting pada banyak gedung bertingkat. Elevator jenis ini menggunakan penggerak berupa motor sinkron linear magnet permanen. Permasalahan dalam sebuah elevator linear terjadi saat magnet yang terdapat pada kereta elevator akan masuk atau keluar dari sebuah lilitan stator. Proses ini menimbulkan terjadinya gaya tarik ke arah yang berlawanan sebelum menuju arah yang dituju. Hal ini menyebabkan ketidaknyamanan pengguna elevator. Oleh karena itu, pengendalian posisi dibutuhkan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Pada penelitian ini digunakan pengendali *sliding mode* untuk melakukan pengendalian posisi pada elevator linear. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali yang diusulkan memiliki performa

Keywords— *Permanent Magnet; Linear Synchronous Motor; Linear Elevator; Sliding Mode Controller*

I. PENDAHULUAN

Saat ini, penggunaan elevator linear semakin menarik perhatian seiring dengan meningkatnya ketinggian dari sebuah bangunan [1],[2]. Hal yang harus diperhatikan dalam pembangunan sebuah bangunan bertingkat, ialah sistem transportasi vertikalnya. Elevator merupakan sistem transportasi vertikal utama dalam sebuah bangunan. Motor sinkron linear magnet permanen merupakan jenis motor yang paling cocok digunakan dalam sistem elevator linear, apabila dibandingkan dengan jenis motor linear yang lain, karena memiliki densitas gaya yang tinggi [3].

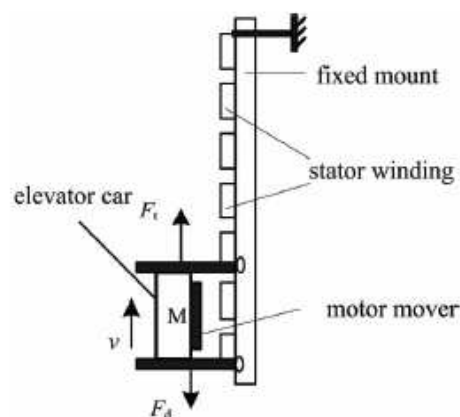
Banyak metode pengendali yang telah dikembangkan untuk pengaturan PMLSM, diantaranya ialah pengendali *sliding mode* [4] [5] [6]. Pengendali *sliding mode* memiliki kekokohan terhadap perubahan parameter, tetapi juga memiliki kekurangan yaitu fenomena *chattering* yang dapat mempengaruhi performa sistem. Tujuan pengendali pada penelitian ini ialah agar respon sistem dapat mengikuti model referensi yang diberikan. Agar tujuan diatas terpenuhi maka dirancang pengendali *sliding mode* dengan modifikasi permukaan luncur PID. Modifikasi SMC ini digunakan unruk mengurangi fenomena *chattering*

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dibahas mengenai sistem elevator linear, model matematis PMLSM serta pengendali Reference Model Sliding Mode Controller.

A. Model Fisik dari Elevator Linear

Struktur fisik sederhana dari sistem elevator linear ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari empat bagian utama, yaitu belitan stator, motor penggerak, bagian tetap (*fixed mount*) dan kereta elevator. Struktur utama dari motor sinkron linear magnet permanen adalah bagian tetapnya serta magnet permanen pada kereta. Perpindahan jarak dan gaya dorong ditingkatkan oleh motor sinkron linear magnet permanen.

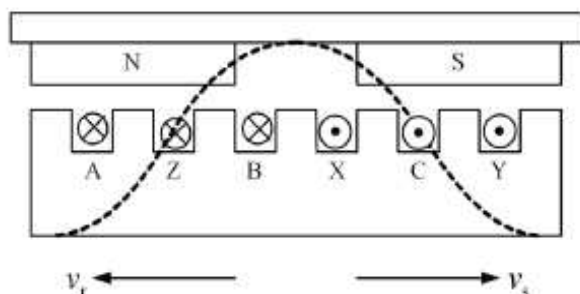


Gambar 1 Model Fisik dari Elevator Linear

B. Model Matematika PMLSM

Struktur fisik dari motor sinkron linear magnet permanen terdiri dari dua bagian utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. . Komponen atas adalah elemen bergerak yang berisi magnet permanen, dan komponen bawah adalah bagian tetap yang berisi deretan kumparan-kumparan. Celah udara antara kedua elemen tersebut memungkinkan terjadinya pergerakan distribusi gelombang magnetik fluks, yang berinteraksi dengan arus yang mengalir melalui kumparan-kumparan untuk menghasilkan gaya dorong ke arah gerakan.

Ada beberapa hipotesa yang digunakan dalam proses dasar model matematika. Diantaranya rugi-rugi arus eddy dan histerisis tidak diperhitungkan konduktivitas damper dari magnet permanen adalah nol. Untuk motor sinkron linear magnet permanen, anggap $L_q=L_d=L$. Dalam axis stator, arus stator (i_a, i_b, i_c) ditransformasikan dalam axis d,q dari referensi stator melalui transformasi 3/2.



Gambar 2 Struktur Fisik Motor Sinkron Linear Magnet Permanen

Persamaan tegangan di axis d adalah:

$$L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_d + Lvi_q \quad (1)$$

Persamaan tegangan pada axis q adalah:

$$L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_q - K_t v - Lvi_d \quad (2)$$

Anggap $i_d = 0$, sehingga didapatkan

$$L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_q - K_t v \quad (3)$$

di mana:

L – induktansi rotor

i_q – arus stator pada axis q

i_d – arus stator pada axis d

R – resistansi stator

u_q – tegangan stator pada axis q

K_t – koefisien gaya *back electromotive*

v – kecepatan

Persamaan gerakan mekanik adalah:

$$M\dot{v} = F_m - F_d - Bv \quad (4)$$

di mana:

M – kualitas dari bagian pergerakan

F_m – gaya dorong

F_d – gaya beban

B – koefisien *viscous friction*

Setelah konversi vektor, *response time* dari *loop* arus lebih cepat daripada *loop* tegangan dan *loop* posisi, sehingga *loop* arus disederhanakan sebagai *loop* proporsional dan *loop* tegangan motor sinkron linear magnet permanen dianggap sebagai orde-

satu. Sehingga persamaan dari motor sinkron linear magnet permanen dapat ditulis sebagai berikut:

$$M\dot{v} = -Bv - f \operatorname{sgn}(v) + K_t i_q + mg \quad (5)$$

di mana:

f – gaya *static friction*

K_t – koefisien dorong

m – kualitas dari penggerak motor dan *elevator cart*

Diasumsikan $M = m$, sehingga Persamaan (6) dihasilkan:

$$\dot{v} = -av - d \operatorname{sgn}(v) + bi_q + g \quad (6)$$

di mana $a = B / M, d = f / M, b = K_t / M$

Nilai parameter yang digunakan adalah $K_t = 21.78$, $\phi = 0.168 \text{ Wb}$, $R = 10.2 \Omega$, $L = 2.63 \text{ Mh}$, $d = 18.7 \text{ N}$, $B = 13.3 \text{ Ns/m}$, $M = 15 \text{ kg}$, $\tau_n = 42 \text{ mm}$, $c = 20$, $k_0 = 0.6$, $k_l = 20$.

C. Sliding Mode Controller

The template is used to format your paper and style the text. All margins, column widths, line spaces, and text fonts are prescribed; please do not alter them. You may note peculiarities. For example, the head margin in this template measures proportionately more than is customary. This measurement and others are deliberate, using specifications that anticipate your paper as one part of the entire proceedings, and not as an independent document. Please do not revise any of the current designations.

SMC merupakan salah satu teknik kendali untuk sistem linear maupun non linear. Metode pengendalian ini dilakukan dengan memaksa trayektori *state* suatu sistem untuk menuju ke dalam sebuah permukaan luncur tertentu. Setelah sampai pada permukaan luncur tertentu, sinyal kendali akan berusaha mempertahankan trayektori *state* tetap berada pada permukaan luncur. SMC termasuk dalam kategori kendali umpan balik yang memiliki pensaklaran berkecepatan tinggi (*high speed switching feedback control*) [12]. Hal ini mengakibatkan trayektori *state* di sekitar permukaan luncur berosilasi dengan frekuensi tinggi atau yang disebut dengan fenomena *chattering*. Osilasi tersebut menjadi permasalahan stabilitas sistem. SMC dikenal dengan kekokohnya dalam mengatasi gangguan. Permukaan luncur secara umum didesain dengan menggunakan kombinasi linear variabel *state*. Permukaan luncur didefinisikan sebagai $\sigma(x)$ atau s :

$$s \cdot x(t) = 0 \quad (7)$$

Dalam *sliding mode controller* diperlukan dua macam sinyal kendali, sinyal kendali tersebut mampu membawa trayektori *state* menuju permukaan luncur serta mempertahankan trayektori *state* agar tetap berada di sekitar permukaan luncur, yaitu sinyal kendali ekuivalen dan sinyal kendali natural. Sinyal kendali ekuivalen memaksa *state* untuk menuju ke permukaan luncur. Sinyal kendali natural mempertahankan *state* agar tetap berada di sekitar permukaan luncur (u_N). Sinyal kendali total merupakan penjumlahan dari dua sinyal kendali tersebut dan dapat ditulis:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (8)$$

dapat diilustrasikan dengan persamaan sistem berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{x} &= Ax + Bu_{eq} + Bu_N\end{aligned}\quad (9)$$

Sinyal kendali ekivalen merupakan sinyal yang membawa trayektori state menuju permukaan luncur. Pada saat trayektori state tidak berada pada permukaan luncur ($\sigma(x)$ tidak bernilai 0). Nilai $\sigma(x) > 0$ ketika trayektori state berada di atas permukaan luncur sedangkan nilai $\sigma(x) < 0$ ketika trayektori state berada di bawah permukaan luncur. Untuk keadaan ini, dapat juga dituliskan bahwa,

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}(x) &= 0 \\ s\dot{x} &= 0 \\ s(Ax + Bu_{eq} + Bu_N) &= 0\end{aligned}\quad (10)$$

Pada perhitungan sinyal kendali ekivalen, sinyal kendali natural dianggap nol, sehingga :

$$\begin{aligned}sAx + sBu_{eq} &= 0 \\ sBu_{eq} &= -sAx \\ u_{eq} &= -(sB)^{-1}sAx\end{aligned}\quad (11)$$

Setelah didapat sinyal kendali ekivalen, dapat ditemukan sinyal kendali natural.

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}(x) &= sAx + sBu_{eq} + sBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= sAx + sB(-sB)^{-1}sAx + sBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= sAx - sB(sB)^{-1}sAx + sBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= sAx - sAx + sBu_N \\ \dot{\sigma}(x) &= sBu_N\end{aligned}\quad (12)$$

Sinyal kendali natural adalah sinyal kendali yang mempertahankan state pada permukaan luncur. Untuk mendesain sinyal ini, diperlukan analisis kestabilan Lyapunov:

$$\begin{aligned}s\dot{\sigma} &< 0 \\ \sigma(x)\dot{\sigma}(x) &< 0\end{aligned}\quad (13)$$

Untuk memberikan verifikasi yang mudah dari kondisi cukup untuk terbentuknya dan tercapainya (*existence and reachability*) SMC, Persamaan (2.30) digunakan. Ada dua kondisi yang berlaku dari Persamaan (2.30), yang pertama, jika nilai $\sigma(x)$ lebih kecil dari nol maka turunanannya haruslah bernilai lebih besar dari nol, sedangkan jika nilai $\sigma(x)$ lebih besar dari nol maka turunanannya haruslah bernilai lebih kecil dari nol. Sehingga dari dua kondisi yang berlaku, maka dapat dipilih nilai turunan dari $\sigma(x)$ adalah:

$$\dot{\sigma}(x) = -W \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \quad (14)$$

di mana $W > 0$ sehingga dari Persamaan (10)

$$\begin{aligned}sBu_N &= -W \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \\ u_N &= -(sB)^{-1}W \operatorname{sgn}(\sigma(x))\end{aligned}\quad (15)$$

Sehingga sinyal kendali total adalah:

$$u = u_{eq} + u_N$$

$$u = -(sB)^{-1}sAx - (sB)^{-1}W \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \quad (16)$$

III. PERANCANGAN SISTEM KENDALI

Sliding mode dibangun dari pengendali PID dan pengendali *fuzzy logic*. Diberikan setpoint berupa posisi elevator linear, serta terdapat model referensi yang merupakan respon sistem yang dikehendaki. *Kesalahan* yang digunakan sebagai masukan dari pengendali *sliding mode* merupakan hasil selisih antara posisi model dengan *output feedback* yaitu berupa posisi aktual. *Kesalahan* yang dihasilkan digunakan sebagai pembentuk permukaan luncur dari pengendali *sliding mode*. Permukaan luncur yang digunakan dibentuk dari pengendali PID, sehingga dibutuhkan parameter-parameter SMC berupa gain proporsional, gain integrator dan gain differensial. Keluaran dari SMC adalah berupa sinyal kendali arus. Sinyal kendali ini merupakan masukan bagi sistem untuk menghasilkan keluaran posisi. Sinyal kendali yang yang dihasilkan dari SMC terlebih dahulu harus masuk ke dalam regulator. Regulator arus yang digunakan menggunakan pengendali PI. Hasil keluaran regulator arus menjadi masukan bagi sistem.

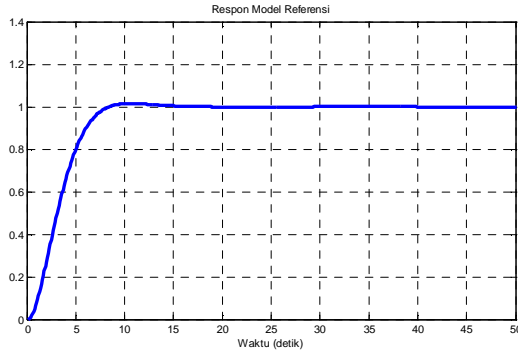
A. Pemilihan Model Referensi

Model referensi digunakan untuk menentukan respon yang ideal terhadap suatu sistem yang dikendali. Pemilihan model referensi harus mencerminkan spesifikasi respon sistem yang baik, seperti *rise time*, *settling time*, *over shoot*, dll. Selain pertimbangan mengenai spesifikasi dari model referensi yang dipilih, yang harus dipertimbangkan lagi ialah bagaimana suatu sistem bisa memiliki perilaku ideal sesuai dengan spesifikasi yang dimiliki oleh model referensi yang dipilih. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu pengendali yang memiliki kemampuan *tracking* yang baik sehingga memungkinkan terjadinya konvergensi *tracking* antara model referensi dengan respon sistem.

Dalam tesis ini, sistem yang dikendali ialah sistem orde dua. Sehingga, model referensi yang dipilih jugalah model referensi orde dua. Model referensi ini bisa dipilih sembarang, tergantung dengan spesifikasi respon sistem yang diinginkan. Dalam tesis ini, model referensi yang dipilih:

$$G(s) = \frac{1}{4s^2 + 3,2s + 1} \quad (17)$$

Respon sistem yang dikendali nantinya harus mengikuti model referensi yang diberikan. Grafik respon sistem yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Respon dari Model Referensi

B. Desain Pengendali Sliding Mode

Dalam penelitian ini, dilakukan pengaturan posisi motor sinkron linear magnet permanen pada elevator linear. Sinyal kendali yang dikeluarkan oleh pengendali ialah sinyal kendali arus. Sinyal kendali arus ini nantinya yang akan menjadi masukan bagi sistem. Untuk mendesain pengendali *sliding mode*, diperlukan persamaan yang menunjukkan dinamika dari sistem. Persamaan dinamika sistem yang digunakan untuk membentuk pengendali *sliding mode* ialah:

$$\dot{v} = -av - d \operatorname{sgn}(v) + bi_q + g \quad (18)$$

Karena yang dilakukan ialah pengaturan posisi sistem, sehingga persamaan 18 diubah ke dalam bentuk persamaan posisi, sehingga didapatkan:

$$\ddot{\theta} = -a\dot{\theta} - d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + bi_q + g \quad (19)$$

Karena disini menggunakan model referensi, sehingga kita harus didapatkan transfer function dari model, persamaannya didapatkan sebagai berikut:

$$\frac{\theta_m}{\theta_r} = \frac{1}{\alpha s^2 + \beta s + 1}$$

$$\theta_r = \alpha \ddot{\theta}_m + \beta \dot{\theta}_m + \theta_m$$

$$\ddot{\theta}_m = \frac{1}{\alpha} (\theta_r - \beta \dot{\theta}_m - \theta_m) \quad (20)$$

Permukaan luncur yang dipilih dibangun dari pengendali PID. Sehingga dalam permukaan luncurnya pasti ada parameter-parameter berupa gain proporsional, gain integral serta gain differensial. Permukaan luncur yang dipilih ialah:

$$s = \lambda_1 e + \lambda_2 \int_0^t e dt + \lambda_3 \dot{e} \quad (21)$$

Untuk membentuk sinyal kendali ekivalen yang memenuhi $\dot{s} = 0$, maka persamaan (21) harus diturunkan terlebih dahulu dan nilainya dibuat nol. Dalam perhitungan sinyal kendali ekivalen, terlebih dahulu sinyal kendali natural dianggap bernilai nol.

$$\dot{s} = 0$$

$$\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e + \lambda_3 \ddot{e} = 0$$

$$\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e + \lambda_3 (\ddot{\theta}_m - \ddot{\theta}) = 0 \quad (22)$$

sehingga didapatkan nilai sinyal kendali ekivalen yaitu:

$$\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e + \lambda_3 \left(\frac{1}{\alpha} (\theta_r - \beta \dot{\theta}_m - \theta_m) - (-a\dot{\theta} - d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + b(i_{q-eq} + i_{q-n}) + g) \right) = 0$$

$$i_{q-eq} = \frac{\lambda_3}{b\alpha} (\theta_r - \beta \dot{\theta}_m - \theta_m) + \frac{\lambda_3}{b} (a\dot{\theta} + d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - g) + \frac{\lambda_3}{b} (\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e) = 0 \quad (23)$$

Sinyal kendali natural didesain dengan menggunakan persamaan Lyapunov, yaitu $\dot{v} = s(\dot{s}) < 0$. Sehingga didapatkan nilai sinyal kendali natural adalah sebagai berikut:

$$\dot{v} = s(-b i_{q-n}) - b i_{q-n} = -k \operatorname{sgn} s$$

$$i_{q-n} = \frac{k}{b} \operatorname{sgn} s \quad (24)$$

Sehingga didapatkan nilai sinyal kendali total ialah:

$$i_q = i_{q-eq} + i_{q-n}$$

$$i_{q-eq} = \frac{\lambda_3}{b\alpha} (\theta_r - \beta \dot{\theta}_m - \theta_m) + \frac{\lambda_3}{b} (a\dot{\theta} + d \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - g) + \frac{\lambda_3}{b} (\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e) + \frac{k}{b} \operatorname{sgn} s$$

Untuk menguji kestabilan sistem maka diperlukan uji kestabilan sistem dengan persamaan Lyapunov dari hasil sinyal kendali yang didapatkan, yaitu:

$$\dot{v} = s(\dot{s}) < 0$$

$$\dot{v} = s\left(-\frac{k}{b} \operatorname{sgn} s\right) < 0$$

$$\dot{v} = -\frac{k}{b} |s| < 0$$

di mana nilai s merupakan definit positif, sehingga terbukti disini bahwa nilai \dot{v} yang dihasilkan nilainya kurang dari nol. Sehingga sistem terbukti stabil

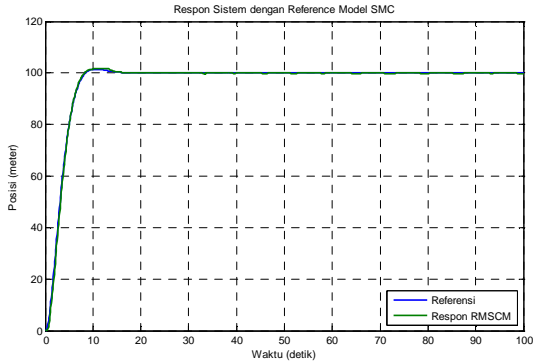
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perancangan yang telah dilakukan pada Bab sebelumnya, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian dan analisis data. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sistem berjalan sesuai dengan harapan, uji performa kemampuan melakukan kinerja dan menjawab tuntutan yang ada. Setelah melakukan pengujian maka dapat diketahui nilai performa dan kemampuan dari sistem yang telah dibuat.

Seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya sistem PMLSM pada elevator linear adalah suatu sistem untuk menguji performa dari pengendali yang telah dirancang yaitu *Reference Model Sliding Mode Controller*.

Ada 2 pengujian yang dilakukan pada pengendali ini diantaranya ialah menguji respon sistem menggunakan

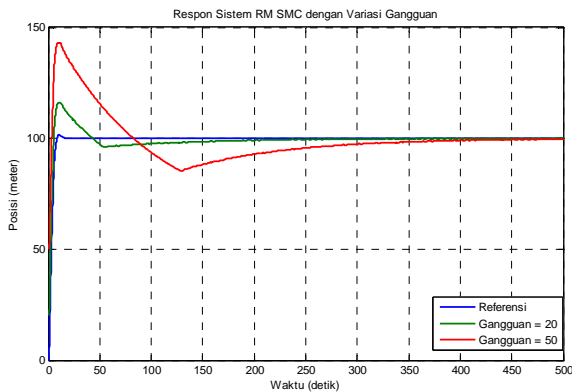
pengendali yang diusulkan tanpa adanya gangguan serta menguji respon sistem menggunakan pengendali yang diusulkan dengan gangguan. Adapun gangguan yang diberikan pada sistem berupa gangguan sinyal eksternal serta variasi parameter SMC (variasi parameter pembentuk permukaan luncur dan variasi nilai konstanta pensaklaran).



Gambar 4 Respon Posisi Sistem dengan RM Fuzzy PID SMC

Pengujian yang pertama ini dilakukan untuk melihat performa pengendali yang digunakan pada sistem motor sinkron linear magnet permanent. Simulasi dilakukan dengan memberikan nilai setpoint posisi sebesar 100 meter, selama 100 detik. Sistem berhasil mengikuti respon dari model referensi yang diberikan, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.

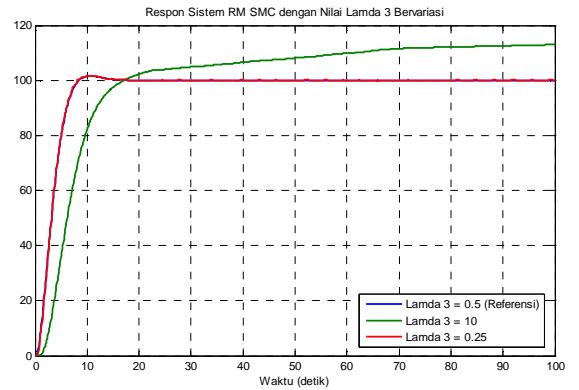
Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan gangguan eksternal dengan nilai yang bervariasi. Gangguan eksternal yang diberikan adalah berupa sinyal acak dengan nilai yang bervariasi. Simulasi dilakukan dengan memberikan nilai setpoint posisi sebesar 100 meter, selama 500 detik. Gangguan sinyal step yang diberikan yaitu sebesar 20 dan 50. Respon dari sistem setelah diberi gangguan sinyal acak dapat dilihat pada Gambar 5. Hasilnya ialah pengendali dapat mengembalikan respon ke keadaan tunak setelah mengalami gangguan dari sinyal step yang diberikan.



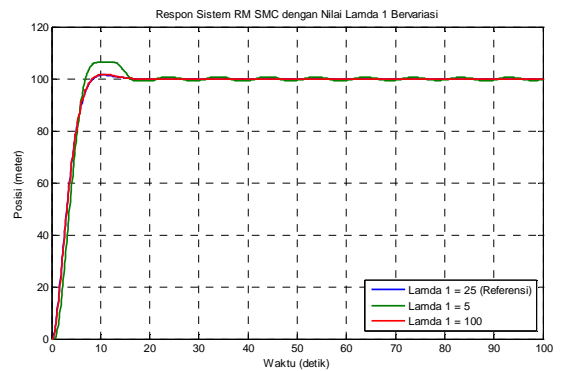
Gambar 5 Respon Sistem RM Fuzzy PID SMC dengan Variasi Gangguan

Pengujian ketiga yang dilakukan pada sistem ialah mengenai perubahan parameter permukaan luncur SMC. Ada empat parameter yang digunakan diantaranya, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ dan k .

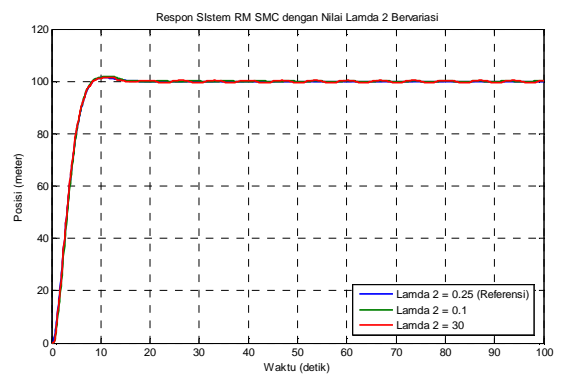
Nilai $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ merupakan parameter pembentuk permukaan luncur. Permukaan luncur dibentuk dengan pengendali PID. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari parameter-parameter SMC terhadap respon sistem apabila diberikan secara bervariasi. Respon sistem saat diberi perubahan parameter SMC yang bervariasi dapat dilihat pada Gambar 6.



(a)



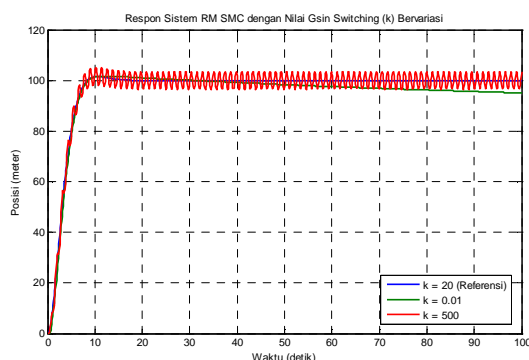
(b)



(c)

Gambar 6 (a) Respon Sistem dengan Variasi λ_1 (b) Respon Sistem dengan Variasi λ_2 (c) Respon Sistem dengan Variasi λ_3

Selain membuat variasi nilai parameter pembentuk permukaan luncur, pengujian untuk variasi nilai konstanta pensaklaran juga diperlukan. Pengujian-pengujian ini diperlukan untuk mengetahui pengaruh-pengaruh dari tiap-tiap parameter terhadap respon sistem, dan kemudian hasilnya akan dibandingkan dengan pengendali yang diusulkan. Respon sistem untuk variasi nilai konstanta pensaklaran dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Respon Sistem Menggunakan RM SMC dengan Variasi Konstanta pensaklaran

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa, pemberian nilai variasi parameter $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ mempengaruhi transien dari respon sistem, pemberian nilai yang tidak tepat dapat menyebabkan terjadinya *overshoot* yang besar, osilasi serta kesalahan keadaan tunak yang besar. Pemberian nilai variasi konstanta pensaklaran berpengaruh pada efek *chattering* yang terjadi. Semakin besar nilai konstanta pensaklaran yang diberikan maka semakin cepat dan besar efek *chattering* yang terjadi. Pemberian konstanta pensaklaran yang terlalu kecil menyebabkan respon sistem tidak dapat kembali ke posisi keadaan tunak. Untuk memperoleh respon sistem yang terbaik maka diperlukan pengaturan parameter-parameter yang mempengaruhi sebaik mungkin.

V. KESIMPULAN DAN PENUTUP

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh dari bab sebelumnya maka dapat diambil beberapa kesimpulan dan saran

untuk penelitian selanjutnya yaitu pengendali *reference model sliding mode* dapat digunakan untuk pengaturan tracking posisi motor sinkron linear magnet permanen (PMLSM). Hasilnya adalah respon sistem dapat mengikuti model referensi yang diberikan, saat diberikan gangguan pun respon sistem dapat kembali ke keadaan tunak.

Adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan berikutnya ialah dapat dilakukan penelitian dengan mendesain pengendali *sliding mode* dengan metode pengendali yang lain, seperti jaringan syaraf tiruan, fuzzy adaptif, dll. Selain itu, untuk mendapatkan nilai parameter permukaan luncur dari SMC dapat dilakukan dengan bantuan pengendali adaptif.

REFERENCES

- [1] Takahashi, N., Yamada, T. and Miyagi, D., "Basic Study of Optimal Design of Linear Motor for Rope-less Elevator", *IET 7th International Conference on Computation in Electromagnetics*, 2008; page 202-203.
- [2] Jikai Si, Xudong Wang, Hao Chen, Shiyong Yuan and Liucheng Jiao, "Analysis of Detent Force in a Discontinuous Primary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *11th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008; page 873.
- [3] Xudong Wang, Zan Zhang, Xiaozhuo Xu and Yinghua Cui, "Influence of Using Conditions on The Performance of PM Linear Synchronous Motor for Ropeless Elevator", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011; page 1-5.
- [4] Qing Hu, Hongxia Li, Hiayan Yu, Guoqing Chang, "Reference Model Sliding Model Velocity Control for Linear Elevator Using Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2009; page 5374-5377.
- [5] Fallahi, M. and Azadi, S., "Fuzzy PID Sliding Mode Controller Design for The Position Control of a DC Motor", *International Conference on Education Technology and Computer*, 2009; page 73-77.
- [6] Utkin, V.I., "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Trans.* vol.40, 1993; page 23-26.